

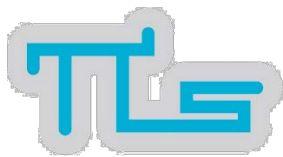
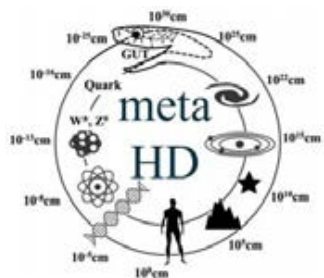
2025年度 核融合科学研究所 成果報告会

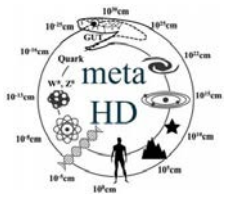
エネルギー循環における 劇的変容現象のシミュレーション研究

長谷川 裕記^{1,2}

¹自然科学研究機構 核融合科学研究所
研究部 メタ階層ダイナミクスユニット

²総合研究大学院大学
先端学術院 核融合科学コース





Outline

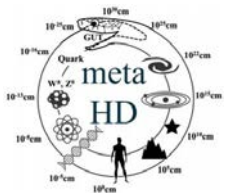
- **1. Introduction**

自然界における爆発的な現象、地球磁場逆転現象

- **2. 球殻ダイナモのシミュレーションモデル**

- **3. シミュレーション結果**

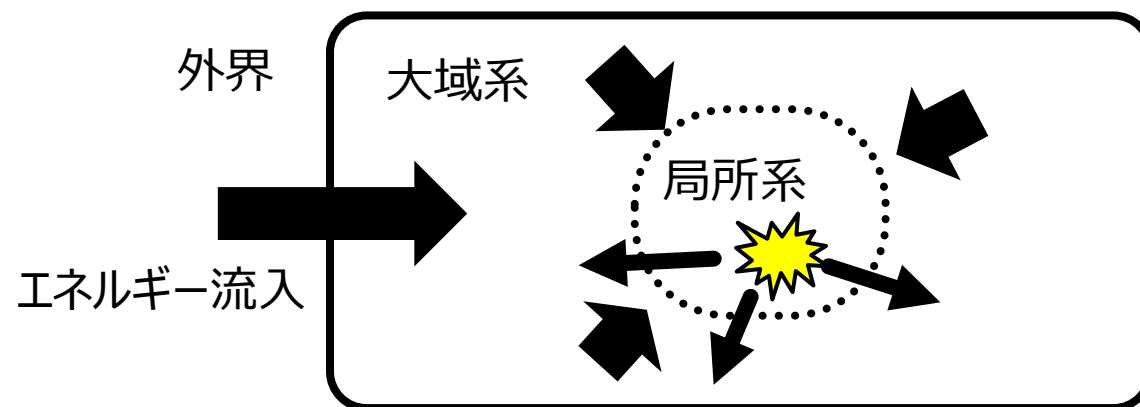
- **4. まとめ と 今後の展望**

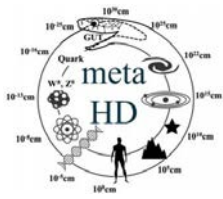


1. Introduction

自然界における爆発的な現象

地球を取り巻く自然界では、多くの劇的に変容する現象
 ～絶えず外部からエネルギー流入がある非平衡開放系において、
 淀み点へのエネルギーの集中が起き、その爆発的な解放、
 新しいフェーズへの転換が生じることにより生起する現象～
 が繰り返されている。





1. Introduction

自然界における爆発的な現象

地球を取り巻く自然界では、多くの劇的に変容する現象
～絶えず外部からエネルギー流入がある非平衡開放系において、
淀み点へのエネルギーの集中が起き、その爆発的な解放、
新しいフェーズへの転換が生じることにより生起する現象～
が繰り返されている。

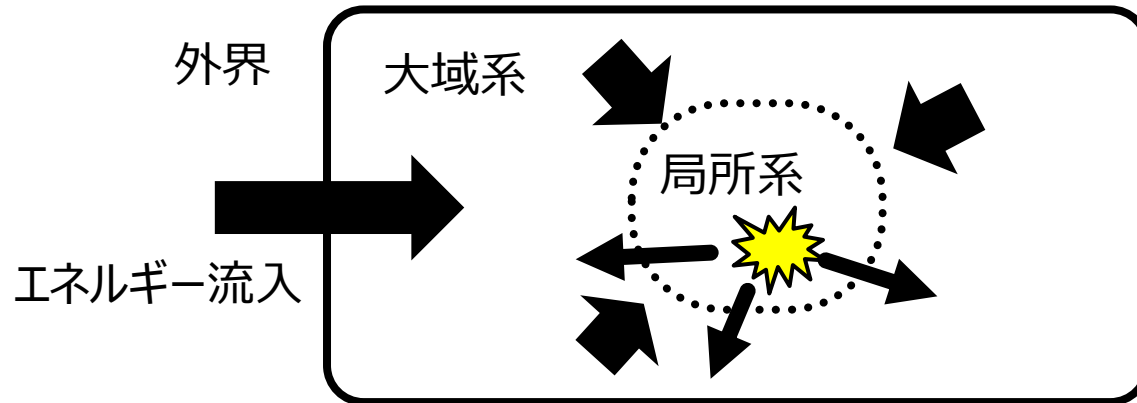
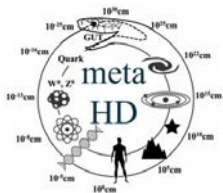


Figure 2
in H. Hasegawa and T. Sato,
Plasma Fusion Res. **5**, 020 (2010).

過去の研究例：
ジャイアントイオン音波ダブルレイヤー [1]

- [1] T. Sato, H. Takamaru and the Complexity Simulation Group,
Phys. Plasmas **2**, 3609 (1995).
[2] H. Hasegawa and T. Sato, Plasma Fusion Res. **5**, 020 (2010).



1. Introduction

自然界における爆発的な現象

地球を取り巻く自然界では、多くの劇的に変容する現象
～絶えず外部からエネルギー流入がある非平衡開放系において、
淀み点へのエネルギーの集中が起き、その爆発的な解放、
新しいフェーズへの転換が生じることにより生起する現象～
が繰り返されている。

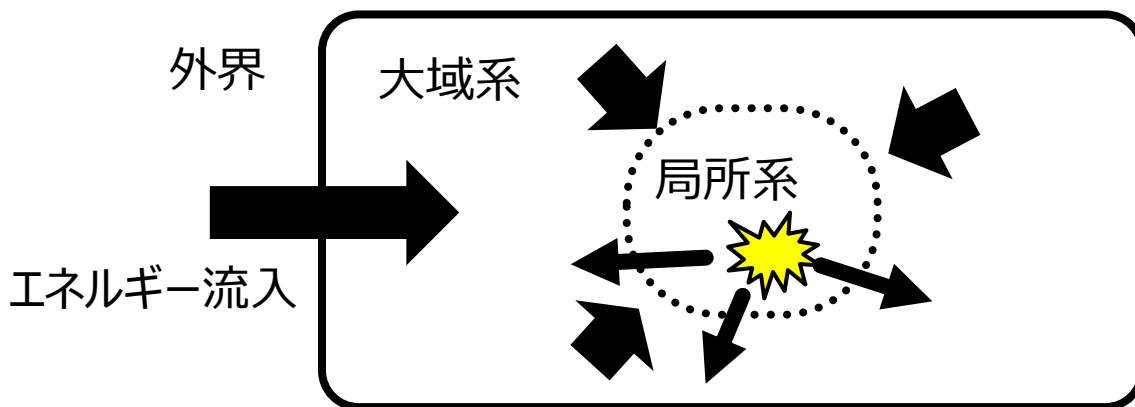
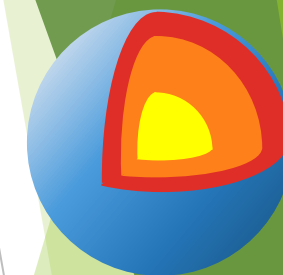


Figure 1
in H. Hasegawa, N. Ohno,
and T. Sato,
J. Geophys. Res. (Space
Physics) **115**, A08304
(2010).



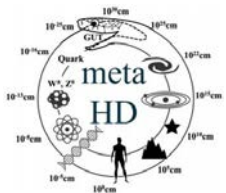
具体例：

- 太陽風-磁気圏-電離層結合系で繰り返される諸現象
 - 地球磁場逆転現象
- など

自己無撞着な説明は難しい



マクロ-ミクロ連結 (MMI) 手法などを用いた
シミュレーションによる研究

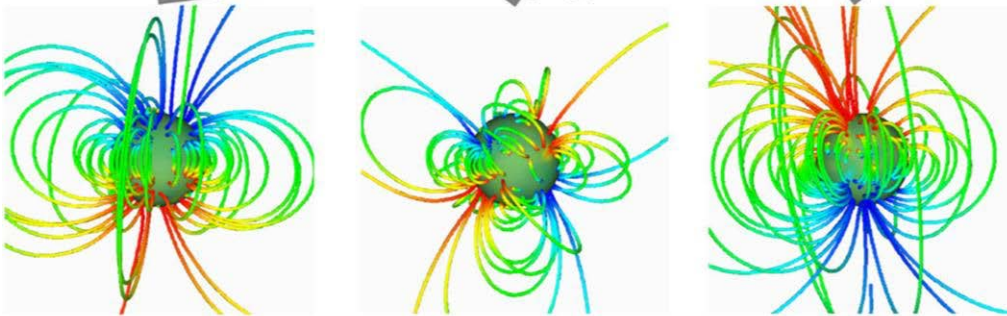
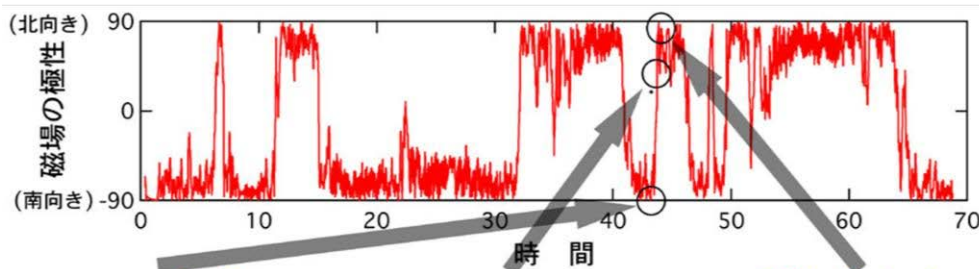
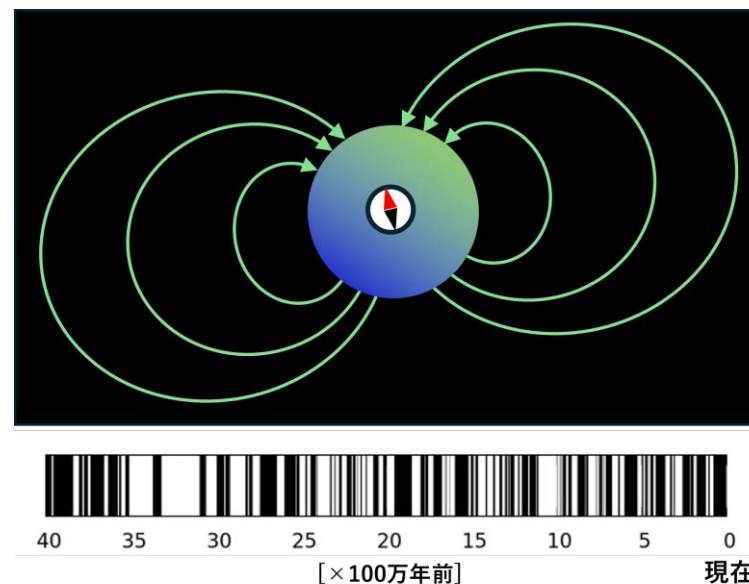


1. Introduction

地球のダイポール磁場

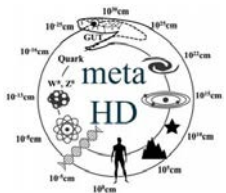
地球外核の流体鉄の熱対流にともなう
MHD過程で形成

過去に幾度も極性が反転
非周期的（間歇的）、かつ、
長いタイムスケールで発生



核融合研の シミュレーショングループによる再現

[3] J. Li, T. Sato, and A. Kageyama,
Science **295**, 1887 (2002).



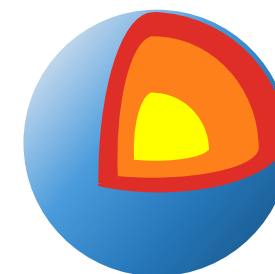
1. Introduction

地磁気反転メカニズムの解明へ

これまでの多くの研究：

MHDの範疇での非線型モードカップリングなど

⇒ サイクリック、かつ、短いタイムスケールでの極性反転



観測されている地磁気反転（間歇的・長いタイムスケール）を説明できない

本研究では、地磁気反転の真の機構解明をめざす

学術的重要性： 自然界の突発現象を解明・解析する手段の構築への挑戦

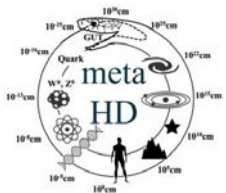
社会的的重要性： 反転発生時の弱磁場環境下では、宇宙からの高エネルギー粒子を防ぐことができなくなり、生物に多大な影響をおよぼす可能性
⇒ 反転メカニズムの解明は未来予測、災禍予防につながる

地球の複雑さを排した準定常なフローによる球殻ダイナモの計算：

H. Hasegawa, H. Ohtani, T. Sato, "*Bi-Stable Dipole Polarity in Spherical Shell Dynamo with Quadruple Convection*", Scientific Reports **16**, 11875 (2026).

プレスリリース（核融合研、総研大）（2026年4月24日）：

地球型ダイポール磁場の南北2つの磁極の安定解を発見 —地球磁場反転の物理機構解明への大きな手がかり—



2. 球殻ダイナモのシミュレーションモデル

- 球殻MHDダイナモコード [4] :
球殻中の圧縮性磁気流体のダイナミクスを解く
MHDコード [陰山 (神戸大)] 。
計算格子としてインヤン (Yin-Yang) 格子を用い、
空間微分は有限差分法、時間発展は
Runge-Kutta-Gill法により計算。
- 可視化ツール (in-situ可視化ライブラリ**VISMO**の
Yin-Yang格子用バージョン [5]) を実装。

Figure 3
in A. Kageyama
and T. Sato,
Geochem. Geophys.
Geosyst. **5**, Q09005
(2004).

Yin-Yang 格子 (Kageyama & Sato,
Geochem. Geophys. Geosyst. **5**,
Q09005 (2004))

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho \mathbf{v})$$

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{v})}{\partial t} = -\nabla p + \mathbf{j} \times \mathbf{B} + \mu \left[\nabla^2 \mathbf{v} + \frac{1}{3} \nabla (\nabla \cdot \mathbf{v}) \right] + \mathbf{F}$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\gamma p \nabla \cdot \mathbf{v} + (\gamma - 1) \left[K \nabla^2 T + \eta \mathbf{j}^2 + 2\mu \left(\mathbf{e}_{ij} \mathbf{e}_{ij} - \frac{1}{3} (\nabla \cdot \mathbf{v})^2 \right) \right]$$

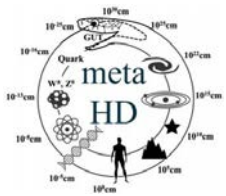
$$\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = -\mathbf{E} + \frac{\eta}{\mu_0} \nabla^2 \mathbf{A}$$

$\mathbf{F}$: Force term $\mathbf{e}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right)$

μ : 粘性係数
 γ : 比熱比 (=5/3)
 K : 熱伝導度
 η : 電気抵抗率

[4] A. Kageyama et al., Physics. Plasmas **2**, 1421 (1995).

[5] N. Ohno and A. Kageyama, Earth Planets Space **73**, 158 (2021).



2. 球殻ダイナモのシミュレーションモデル

プラズマフローの付与（フォース項の付加）

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{v})}{\partial t} = -\nabla p + \mathbf{j} \times \mathbf{B} + \mu \left(\nabla^2 \mathbf{v} + \frac{1}{3} \nabla(\nabla \cdot \mathbf{v}) \right) + \underline{\mathbf{F}}$$

$$\mathbf{F} = \sum_{i=1}^{N_f} \mathbf{F}_i$$

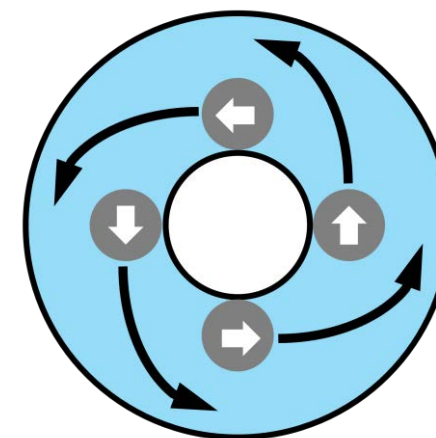
フォース項によって、
プラズマフローを付与する。

$$\mathbf{F}_i = F_0 (-\vec{e}_x \sin \phi_i + \vec{e}_y \cos \phi_i)$$

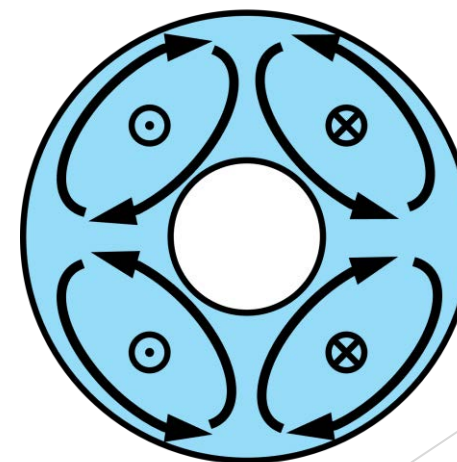
$$\times \exp \left[-\frac{(-x \sin \phi_i + y \cos \phi_i)^2}{l^2} - \frac{(x \cos \phi_i + y \sin \phi_i - a)^2}{d^2} - \frac{z^2}{d^2} \right]$$

$$\phi_i = \frac{2\pi}{N_f} (i - 1)$$

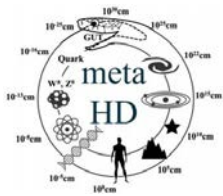
$N_f = 4$ の場合のフローの模式図 →



赤道断面

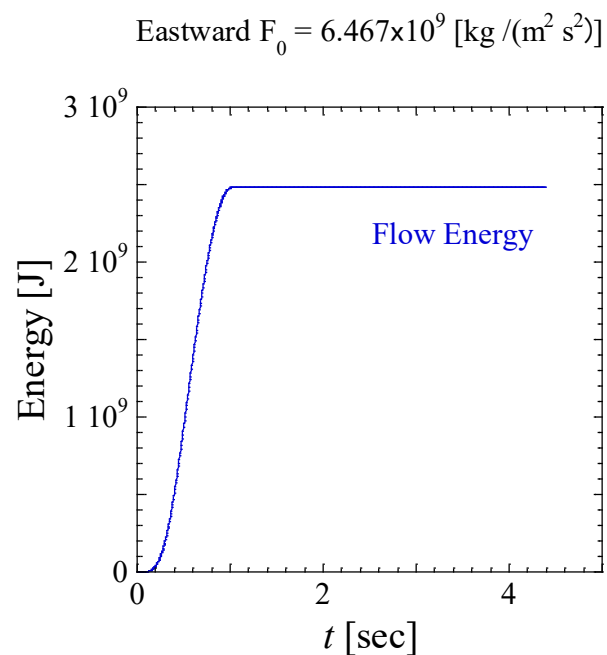


子午線断面

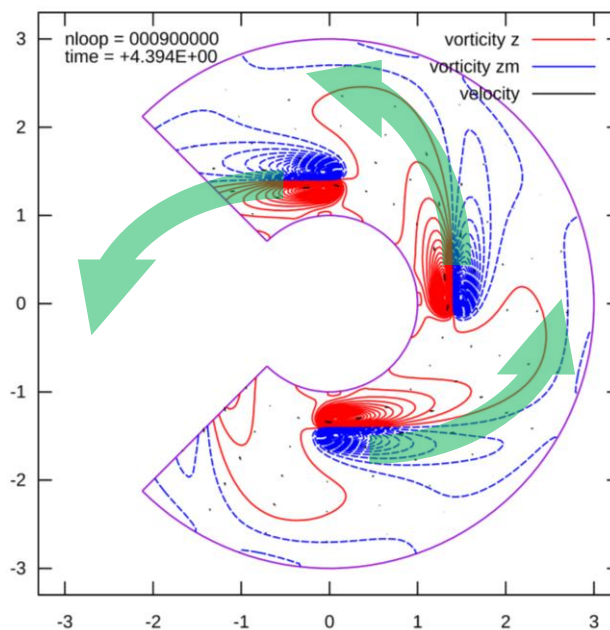


2. 球殻ダイナモのシミュレーションモデル

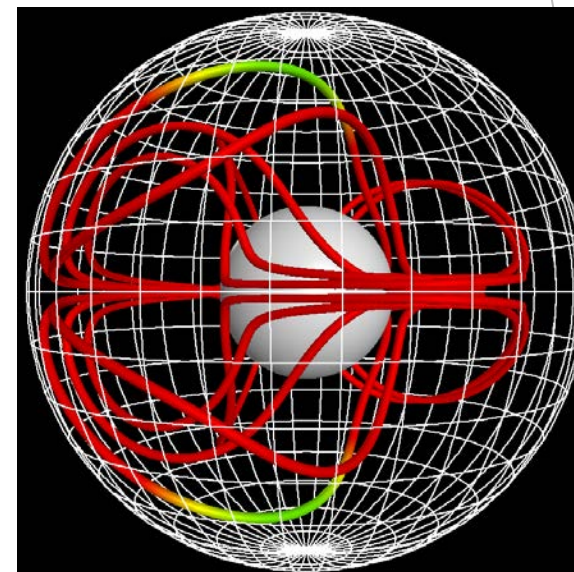
プラズマフローの付与（フォース項の付加）



フロー全エネルギーの
時間変化

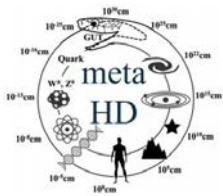


赤道断面（Yin側）の
フローの様子



VISMOで描いた
プラズマフローの流線

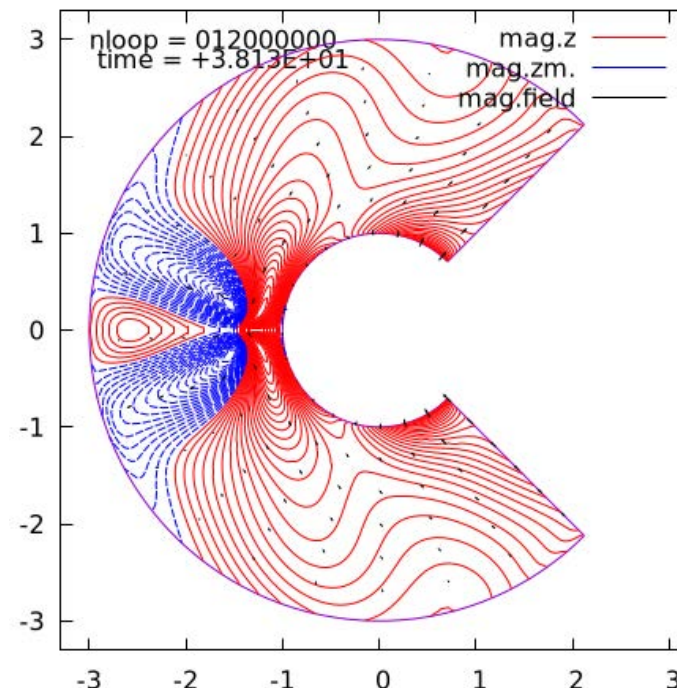
準定常な流れが得られる。



3. シミュレーション結果

磁場の形成

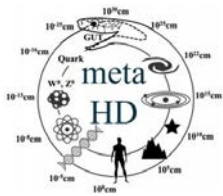
Figure 4
in H. Hasegawa, H. Ohtani,
and T. Sato,
Scientific Reports **16**, 11875
(2026).



子午線断面 (Yang側) の
磁場 (z成分) の様子

全エネルギー、
流れのヘリシティ、
磁場モーメントの
時間変化

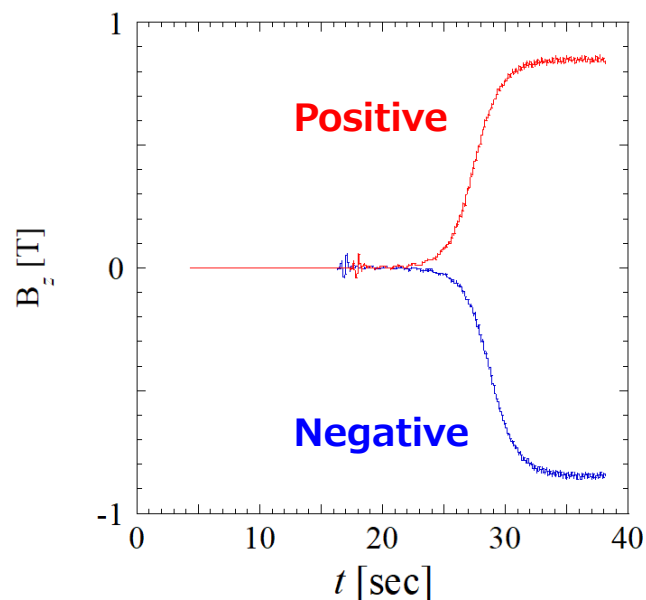
**ダイポール成分が卓越した
磁場の形成**



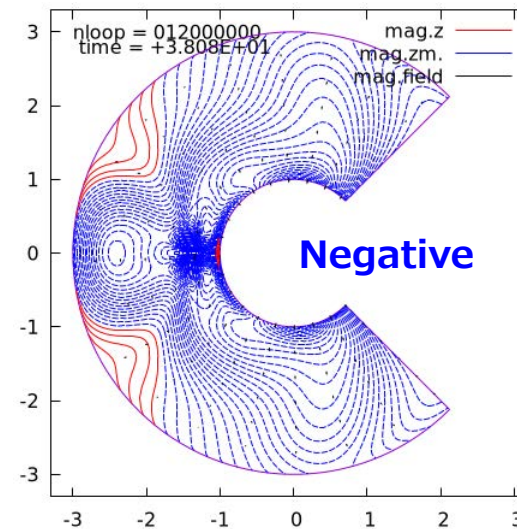
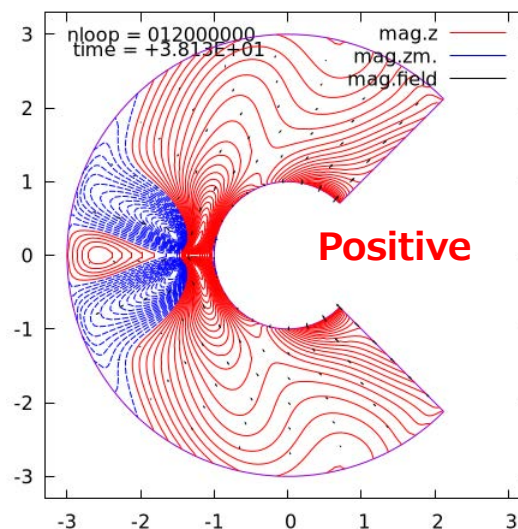
3. シミュレーション結果

ダイポール磁場の極性

初期に疑似乱数を用いて与える磁場の微小揺動の違いにより、正の極性か負の極性のどちらかに至り、その状態が安定に続く。

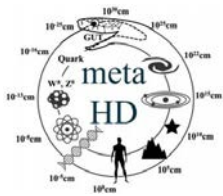


ダイポール成分の時間変化
(正の場合と負の場合)



子午線断面での磁場のz方向成分の分布
(正の場合と負の場合)

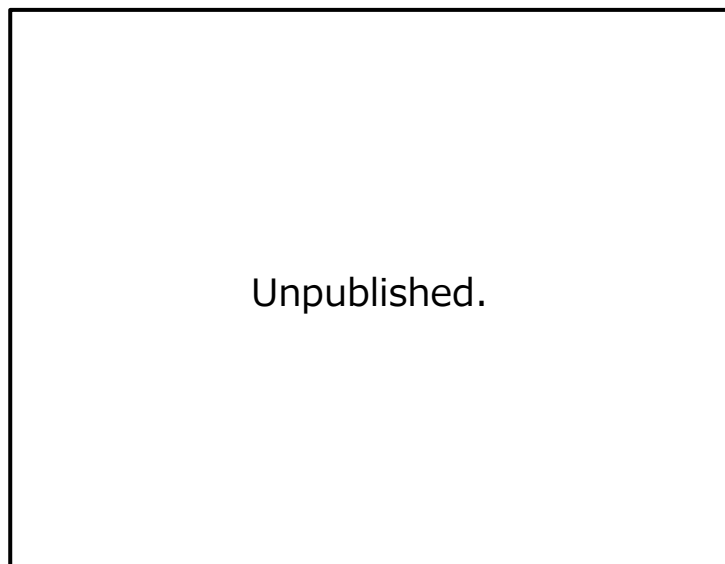
今回のパラメタ領域では、このMHD方程式系において、2つの解が存在する。



3. シミュレーション結果

ダイポール磁場の極性

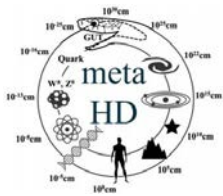
初期の磁場として、50種類のランダムな微小磁場揺動を用意し、それぞれについて、シミュレーションを実行。東向きフローだけではなく、西向きフローについても計算。どちらの背景フローについても、ほぼ同じ確率で、正と負の極性が現れる。



磁場揺動 (Run number)、
フローの向き、極性をプロットしたもの

	Positive	Negative
Eastward	20	30
Westward	24	26

この結果は、極性（どちらの解に落ち着くか）は背景のフローではなく、初期の微小磁気揺動によって決まることを示している。

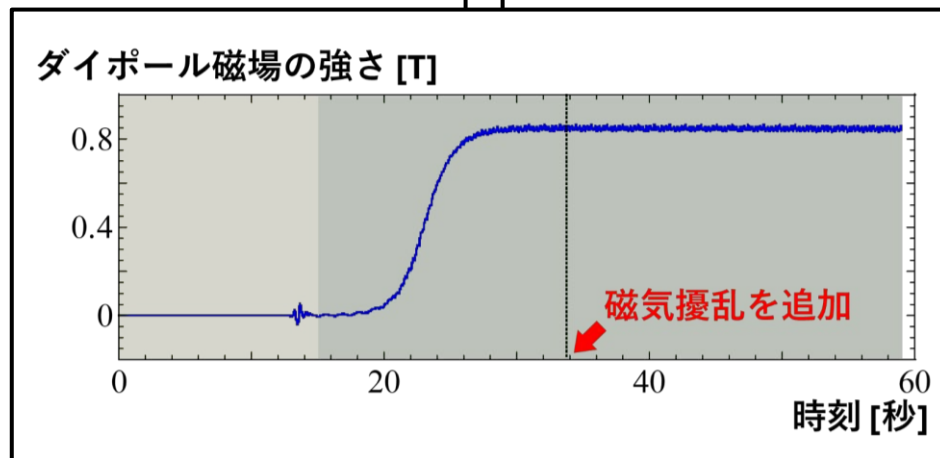


3. シミュレーション結果

磁場の成長過程と安定後の揺動に対する応答

Figure 6
in H. Hasegawa, H. Ohtani,
and T. Sato,
Scientific Reports **16**,
11875 (2026).

Figure 7
in H. Hasegawa, H. Ohtani,
and T. Sato,
Scientific Reports **16**,
11875 (2026).



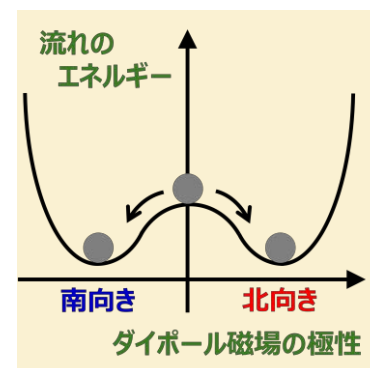
t ~ 34 s で初期に与えた微小揺動と同じものを
付与した場合 ((2)と(3)) の磁場成分の時間変化

磁場の成長過程は、

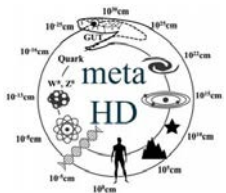
- ・周期的に極性反転が繰り返される初期の時間帯
 - ・極性が定まり安定な状態に至る時間帯
- の 2 つに分けられる。

初期に与えた微小磁場と
同じものを、安定状態に
達したのちに再度付与したところ、
顕著な変化は観察されなかった。

→ 安定状態は極めて強固



プラズマの流れのエネルギーと
極性の関係を示した概念図



4. まとめ と 今後の展望

まとめ

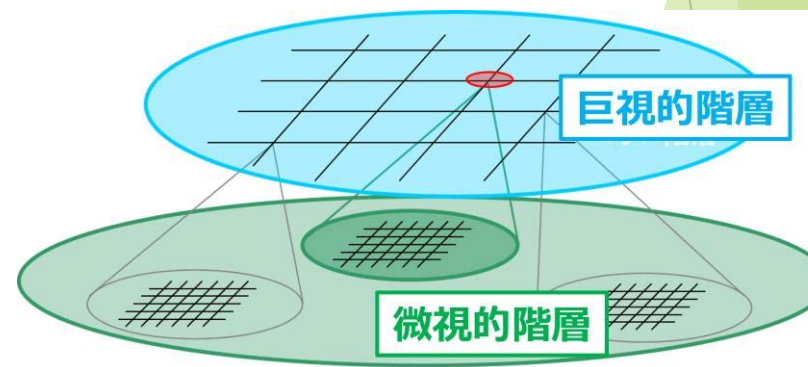
- ・劇的変容現象のひとつである“地球磁場逆転現象”の機構解明をめざして、球殻MHDダイナモシミュレーションの研究を開始。
- ・地球の複雑さを排したプラズマフローを付与するモデル $\Rightarrow$ 準定常な流れが得られる。
- ・プラズマフロー駆動ダイナモによるダイポール磁場の形成 $\Rightarrow$ MHD方程式系における2つの解の存在
- ・その極性（解）は初期の磁場揺動に依存し、その2つの安定な状態（解）は極めて強固



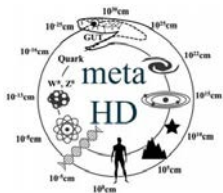
磁場反転を引き起こすには、通常の電磁流体理論の範疇には入っていないトリガー（例えば、ミクロなプラズマ不安定性などによる異常な磁気拡散率や粘性）が必要？

今後の展望

- ・プラズマフロー駆動ダイナモの計算：
パラメタ依存性、時間発展の詳細な解析（ヘリシティ、etc.）
- ・熱対流駆動ダイナモの計算：
 - 極性反転の再現
 - in-situ可視化ライブラリ“**VISMO**”を駆使して極性反転が発生する機構を探索
- ・マクロ-ミクロ連結（MMI）シミュレーションに向けた取り組み



MMI手法の概念図

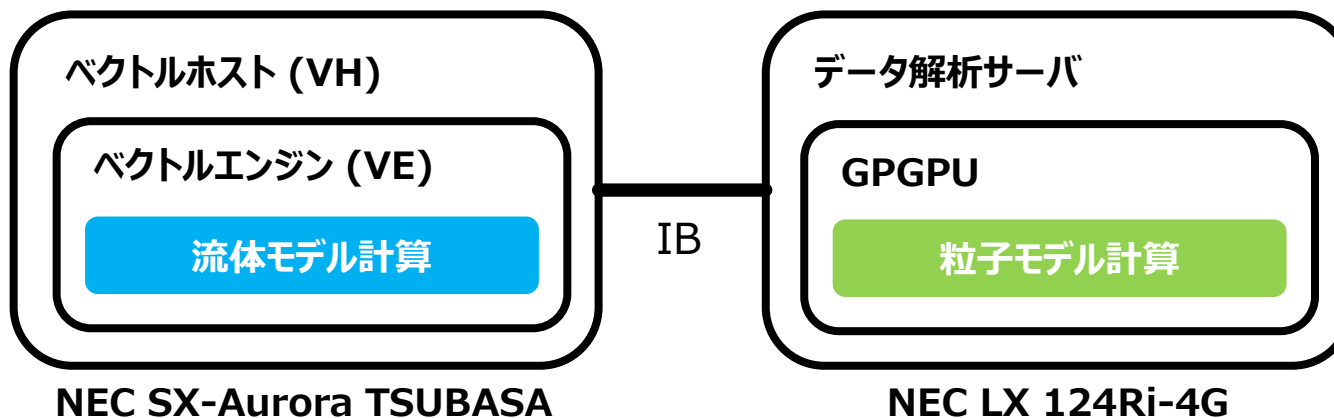
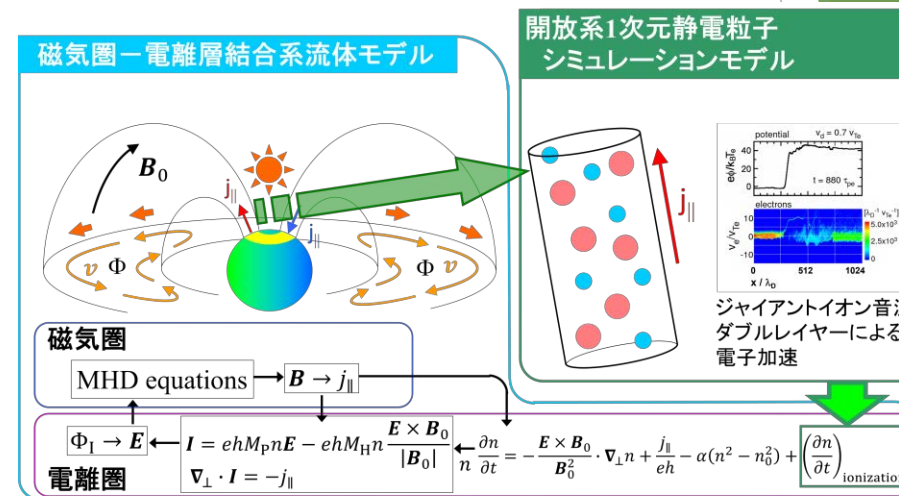


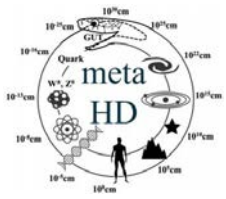
4. まとめと今後の展望

MMIシミュレーションに向けた取り組み： 異アーキテクチャ間連携計算の実行

前プラズマシミュレータシステムにおいて、
オーロラ連結階層シミュレーションコード
(磁気圏-電離層結合系を記述するMHDコードと
オーロラ電子加速の計算を行うPICコードを
マクロ-ミクロ連結手法によって連結したもの)
の異アーキテクチャ間連携計算を実行。

submitted to JASSE





Acknowledgments

本研究は、

- 自然科学研究機構「ネットワーク型研究加速事業」分野融合ネットワーク型共同研究加速「多階層現象の複合大域シミュレーション研究拠点の構築」(01422301)のサブテーマ5
- 核融合科学研究所一般共同研究(プラズマシミュレータ共同研究)(NIFS24KISM005)として実施されたものです。

研究協力者(敬称略)：

大谷寛明(核融合研)、佐藤哲也(核融合研)、石黒静児(核融合研)、森高外征雄(核融合研)、陰山聡(神戸大)、大野暢亮(兵庫県立大)、高丸尚教(中部大)

また、日本シミュレーション学会と核融合科学研究所によって進められている「遠非平衡科学の確立に向けたシミュレーション研究プロジェクト～マクロ・ミクロ連結階層シミュレーションによる『未来を見る望遠鏡』構想～」の一部として実施しています。

前プラズマシミュレータにおける連結階層コードの最適化や連携計算実行においては、山口健太氏(NECソリューションイノベータ(株))にご協力をいただきました。